

حماية خط ضخ عين السودة من الصدمة

الهيدروليكية بطريقة التطعيم

م. ألاء علي الحسن¹ أ. د عادل يوسف جرجي²

الملخص

يعزز استخدام المواد البوليمرية وفق التقنيات المستخدمة بشكل كبير من الموثوقية الهيدروليكية لعمل الأنظمة التصميمية من حيث حماية المشغلين من الأخطار الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية من جهة، وتخفيض الكلفة الاقتصادية لتجهيزات الحماية من جهة أخرى، تم دراسة تأثير تطعيم خط ضخ قرية عين السودة بنسب مختلفة من مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة في موقعين (البداية - المنتصف) وإيجاد العلاقة الرياضية الرابطة بين نسبة التطعيم ونسبة انخفاض الضغط الأعظمي عن قيمته بدون تطعيم، وقد أظهرت النتائج أن مكان التطعيم أثر في انخفاض قيم الضغوط الأعظمية فكلما كان مكان التطعيم أقرب إلى الجهاز المسبب للصدمة الهيدروليكية (المضخة) كان له أثر أكبر في تخفيض قيم الضغوط العالية الناتجة عنها بالإضافة إلى انخفاض ملحوظ في حجم بخار الماء المتشكل عن الصدمة الهيدروليكية.

ولتبيان تأثير تطعيم جزء من خط الضخ على حجم خزان الضغط المضاف للشبكة أجريت مقارنة اقتصادية للسياريوهات الأفضل هيدروليكياً، وأكدت النتائج على أفضلية عملية التطعيم بدل من شراء وتركيب خزان ضغط كبير الحجم، وإن الحل الأمثل والأقل تكلفة هو استخدام خزان صغير (100 Liter) مع تطعيم بنسبة (10 %)، ويمكن أيضاً عن طريق زيادة نسبة التطعيم الاستغناء عن تركيب خزان الضغط.

الكلمات المفتاحية: الصدمة الهيدروليكية، الضخ، الأنابيب، خزان.

¹ طالبة ماجستير في قسم هندسة وإدارة الموارد المائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص - سورية

² أستاذ في قسم هندسة وإدارة الموارد المائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص - سورية.

Protection of Ain Al-Soudah Pumping Pipes from Hydraulic Hammer Using Pipes Made of Different Material

Prof. Dr. Adel Yousef Georgi ¹

Eng. Alaa Ali Al_Hassan ^{II}

Abstract

The use of polymeric materials according to the used technologies greatly enhances the hydraulic reliability of the work of the design systems in terms of protecting operators from the dangers caused by water hummer on the one hand, and reducing the economic cost of protection equipment on the other hand. therefore, we studied the effect of replacing a part of Ain Al-Souda pumping pipe were studied different percentages of high-density polyethylene pipe in three locations (beginning - middle).also we find the mathematical relationship between the ratio of replacing parts and the ratio of maximum pressure drop under its value without the replacing process .

The results showed that the place of replacing affected the decrease in the maximum pressure values. The closer the replacing part site was to the device causing the water hummer (pump) had a greater effect in reducing the high pressure values that result of it , in addition to a noticeable decrease in the volume of water vapor formed by the water hummer.

In order to show the effect of replacing process in a part of the pumping pipe, on the volume of the pressure tank added to the network, an economic comparison was accomplished for the best hydraulic scenarios, and the results confirmed the preference of the replacing parts process instead of buying and installing a large pressure tank. The best and least expensive solution is to use a small tank (100 Liter) with 10% replacing ratio, and by increasing the percentage of replacing parts, it is also possible to dispense with the installation of a pressure tank.

Keywords: Water hummer, pumping, pipe, Tank.

¹ Professor, Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

^{II} Postgraduate Student, Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

1- مقدمة

تعتبر الصدمة الهيدروليكية حدث مهم يتكرر في الأنظمة الهيدروليكية لعدة أسباب ولها دور في تعطيل هذه الأنظمة وانهارها إذا لم تعالج بالشكل الصحيح، وتعتبر الأنابيب جزء مهم من المنظومة الهيدروليكية نظراً للدور الكبير الذي تلعبه مادة الأنابيب في تشكل الضغوط الإضافية وتخميدها التي تنشأ عند حالة الجريان العابر.

الصدمة الهيدروليكية بالتعريف هي: ارتفاع أو انخفاض يطرأ على الضغط الهيدروديناميكي لسائل في أنبوب مضغوط نتيجة تغير سرعة هذا السائل مع الزمن في مقطع من هذا الأنبوب. يمكن أن تنتج عن هذه الصدمة قوة كبيرة يجب أخذها بعين الاعتبار عند حساب سماكة جدران الأنابيب. وقد تكون في بعض الأحيان مدمرة وخطيرة على أمان المشغلين (Stevanovic, V. D. 2009)، الشكل (1).



(b)

(a)

الشكل (1): أضرار الصدمة الهيدروليكية: (a): تحطم صمام نحكم؛ (b): تحطم فلنجة وصل.

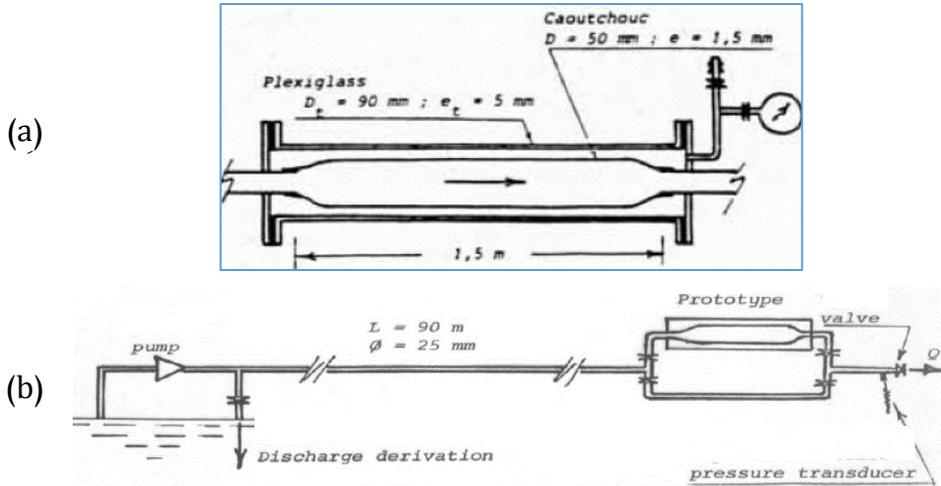
في الواقع يجب على المصمم أن يجد إجابة على سؤال دقيق، فيما إذا كان عليه أن يزيد من متانة الأنابيب وتجهيزات الشبكة على حد سواء لتحمل موجات الضغط (موجب/سالب) العابرة، أو أنه يجب عليه تصميم الحماية المناسبة للصدمة الهيدروليكية والتي ستسمح بالحفاظ على الضغوط غير المستقرة في الأنابيب ضمن الحدود المسموحة، وقد تكون الطريقة الأكثر جاذبية من الناحية العملية هي الجمع بين عدد من أجهزة

الحماية لضمان السيطرة على تغيرات الصعود والهبوط في الضاغط، وهذا يترافق مع عيوب التنفيذ العملي باختلاف نوع المادة، أو التوقف الآلي المفاجئ للنظام الهيدروليكي الذي ينعكس بتحميل جزئي للآليات الهيدروليكية (Pothof & Karney 2012). وبسبب الطبيعة المعقدة للصدمة الهيدروليكية، يمكن أن يؤدي الجهاز الذي يهدف إلى إصلاح حالة موجة صدمة عابرة إلى تفاقم حالة أخرى ناتجة عن اختيار جهاز حماية غير مناسب أو موقع تثبيت غير صحيح في النظام الهيدروليكي (Boulos, P. F; et al 2005).

ولتغلب على القيود المذكورة أعلاه، أجريت أبحاث متزامنة حول موضوع التحكم بالصدمة الهيدروليكية في الأنابيب المضغوطة من قبل (Massouh, F 2009) الذي قدم تقنية هيدروليكية أطلق عليها "ممتص الصدمات"، يمكن أن تخفض التغيرات في الضاغط (موجب/سالِب) المرافقة لحدوث صدمة مائية حادة ناجمة عن الأغلاق المفاجئ للصمام في نهاية أنبوب الضخ، من خلال تخفيض سرعة انتشار الموجة العابرة بالكامل عبر مقطع من الأنبوب قابل للتشوه مثبت في حلقة مع صمامات تسمح لموجة الصدمة بالمرور أما ضمن جهاز الامتصاص أو الفرع الفولاذي الأخر، كما هو موضح في الشكل (2)، وقد أظهرت نتائج المحاكاة والقياسات التجريبية فعالية هذه التقنية في الحماية من الصدمة، حيث نتج عن الأغلاق المفاجئ للصمام ارتفاع زائد بالضغط مقداره (26 bar) في الفرع الفولاذي للحلقة، وعند مرور الموجة من خلال "ممتص الصدمات" يظهر الاختبار أن الضغط الزائد ضئيل نسبياً (أقل من 2 bar) ويتغير الضغط ببطء باتجاه الحالة المستقرة.

وهذه الدراسة كانت استكمال لدراسات سابقة على السلوك اللزج (Viscoelasticity) للمواد البوليميرية من خلال الاستجابة المتأخرة لتمدد/تقلص جدار الأنبوب فيما يتعلق بتقلبات الضغط، على النقيض من الأنابيب المرنة (Elastic pipes) حيث لا يوجد

تأخير بين ارتفاع/انخفاض الضغط وتمدد/تقلص جدار الأنابيب (Ramos, H; et al 2004). وبالتالي يمكن استخدامها بشكل مفيد في تخميد الصدمة الهيدروليكية بناء على التقنية المقدمة سابقاً من قبل (Massouh & Comolet 1984) والتي اقتصر التحقق منها على استخدام المواد البوليميرية كمخمد لموجة الضغط الموجب الناتج عن الصدمة الهيدروليكية.



الشكل (2): النظام الهيدروليكي لتحكم بالصدمة الهيدروليكية: (a): النموذج التجريبي؛ (b): مقطع في الشبكة. اختبر حديثاً (Triki, A. 2016) فعالية تقنية مشابهة للحماية من موجات الصدمة الهيدروليكية التي تسببها صمامات الأغلاق في النظام الهيدروليكي ضمن الأنابيب الفولاذية. وتعتمد هذه التقنية على استبدال مقطع قصير من الأنابيب الرئيسية بآخر مصنوع من مادة بوليميرية، وإجراء اختبار تجريبي وفق السناريوهات الحرجة للضاغط في النظام الهيدروليكي، وباستخدام نوعين من المواد البوليميرية وهما: البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE) والمنخفض الكثافة (LDPE).

لمعالجة المشكلة عددياً، أجريت نمذجة أحادية البعد (1-D) للتصريف باستخدام صيغ نموذج راموس (Ramos, H; et al 2004) المستخدمة لوصف سلوك جدران الأنابيب

وتأثير الاحتكاك في الظروف غير المستقرة للجران، بالتوافق مع استخدام خوارزمية طريقة شبكة المميزات (FG-MOC) لحل المعادلات الحاكمة للصدمة الهيدروليكية. وأوضحت الدراسة (Triki, A. 2016) أن تقنية الحماية المقترحة هي تقنية فعالة لتخميد موجات الضغط (الموجب/السالب) الشديدة للصدمة الهيدروليكية. ويمكن ملاحظة أن التقنية المستخدمة توفر تخميدياً كبيراً لارتفاع الضغط الأولي لموجة الصدم الموجبة والسالبة، وتخميد الضغط هذا يكون أكثر وضوحاً عند استخدام مادة بوليمرية منخفضة الكثافة (LDPE) للأجزاء القصيرة المستبدلة مقارنة باستخدام مادة بوليمرية عالية الكثافة (HDPE)، كما هو موضح في الشكل (3). ويظهر أيضاً من خلال فحص حساسية ذروة الضغط مع متغيرات التحكم بالصدمة المقصورة على حجم المقطع (الطول، القطر) القصير المستبدل، أن الأحجام الكبيرة للقسم القصير توفر تخميدياً كبيراً لارتفاع الضغط. علماً أن هذا الارتباط ليس له أهمية أكثر من تحديد قيمة القطر والطول الأمثل للنظام الهيدروليكي المدروس.

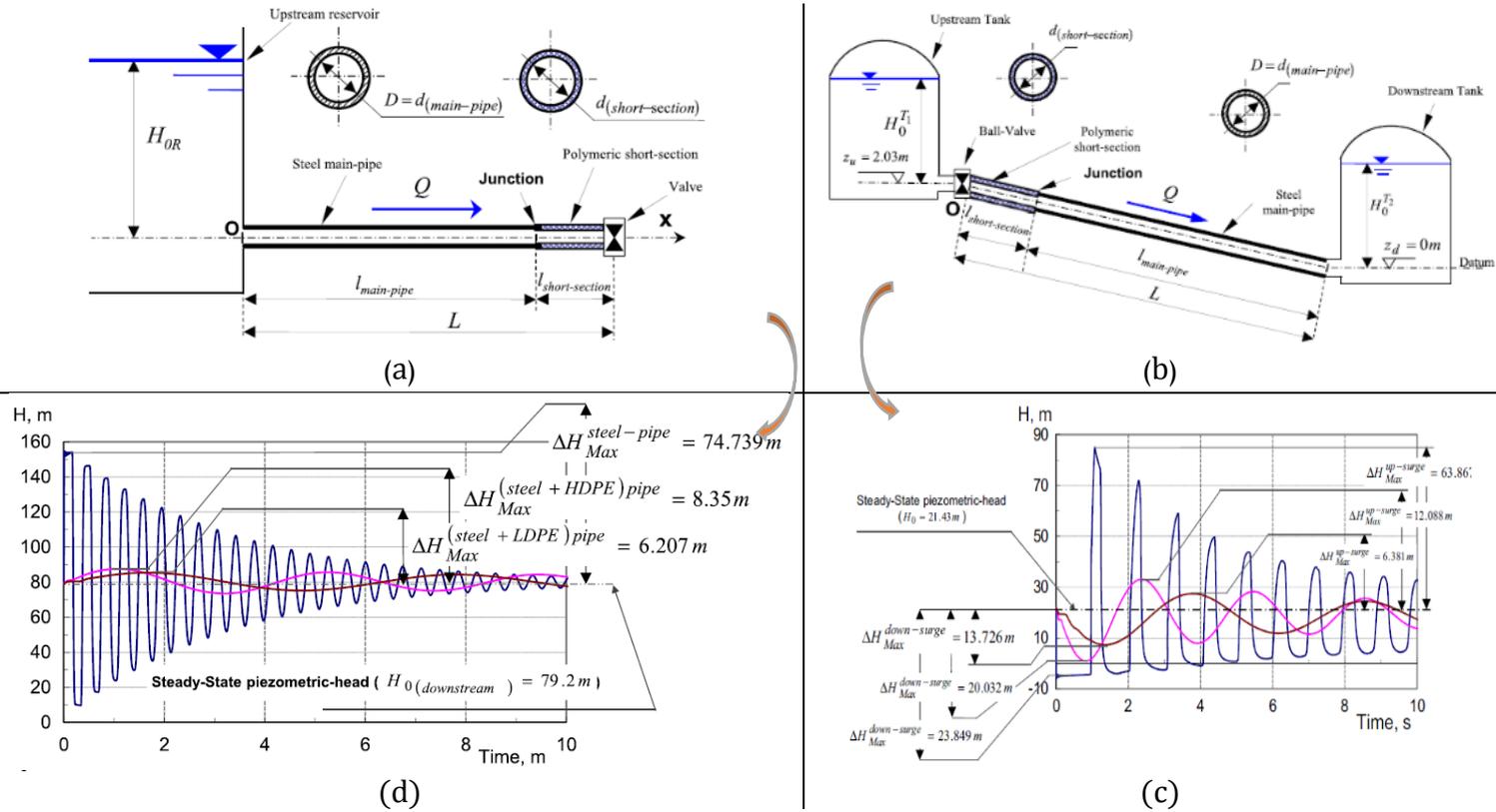
فعالية مثل هذا النهج مبررة من خلال التحقق التجريبي لقدرة التقنية على تجنب موجات الصدمة الهيدروليكية الشديدة مقارنة بالأدبيات العلمية ذات الصلة والقياسات التجريبية. علماً أن هذه الاستراتيجية قد تم إلقاء الضوء عليها سابقاً من قبل (Pezzinga, G. 2002) إلا أنها اقتصرت على استخدام مواد بوليمرية عالية الكثافة (HDPE) كمثبط للصدمة، والحالة المدروسة مرتبطة فقط بموجة الضغط السالب للصدمة. في حين ان الورقة العلمية (Triki, A. 2016) بحثت في سيناريوهات الارتفاع الموجب والسالب للضغط وباستخدام نوعين من المواد البوليميرية (HDPE/LDPE). بهدف تعزيز موثوقية هذه التقنية استكمل (Triki, A. 2017) أبحاثه الهادفة إلى التحكم في التغيرات المفاجئة للضغط (موجب/سالب) في المناطق الحساسة لحدوث الصدمة الهيدروليكية حادة في الأنابيب الفولاذية، وعمدً إلى استخدام أنبوب ضغط قصير وفق تقنية (Penstock) متفرع

جانبياً ومصنوع من نوعين من المواد البوليميرية (HDPE/LDPE)، كما هو موضح في الشكل (4).

وأظهرت نتائج المقارنة مع الأدبيات العلمية والنتائج التجريبية أن استخدام تقنية (Penstock) متفرع جانبياً يمكن أن تخفف ويشكل كبير من التغيرات الحادة في الضغط الناجم عن موجات الصدمة الهيدروليكية. كما وجد أن حجم (Penstock) والمواد المستخدمة فيه تمثل العوامل الرئيسية التي تؤثر على معدل التخماد الرأسي للضغط (موجب/سالب)، مع ملاحظة وجود تخميد كبير في قيمة الضاغظ الأولي لموجة صدم سالبة في حال استخدام مادة منخفضة الكثافة مقارنة باستخدام مواد عالية الكثافة، وهذا يشير بأن المواد الأكثر قابلية لتشوّه ستكون واعدة في إنتاج تخفيض أكبر لزيادات الضغط.

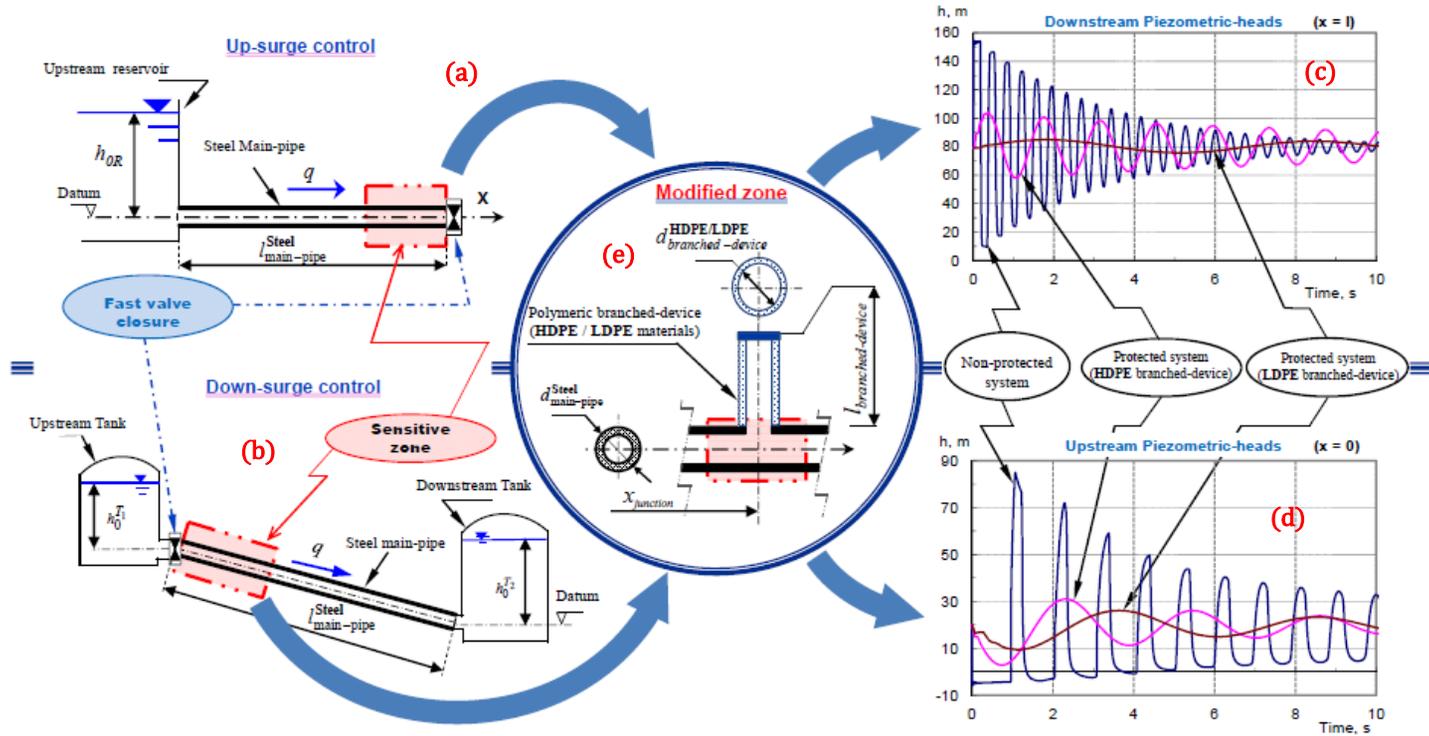
وبالمقارنة مع الاستراتيجية السابقة (Triki, A. 2016) يمكن القول إن معدلات التخماد الرأسية للضاغظ متماثلة تقريباً، غير أن فترة تذبذب موجة الصدم على الزمن أكبر في استراتيجية (Penstock). ومن حيث التنفيذ فأن الاستراتيجية الأخيرة سهلة التنفيذ ولا تتطلب تفكيك جزء من خط الأنابيب الفولاذي. بالإضافة إلى أن هذه الاستراتيجية قد تتجنب الأثر الهيدروليكي التراكمي لأجهزة الحماية المتعددة في خطوط الضخ.

حماية خط ضخ عين السودة من الصدمة الهيدروليكية بطريقة التطعيم



الشكل (3): النظام الهيدروليكي للتحكم بالصدمة الهيدروليكية:

- (a): الصمام في نهاية الأنابيب (ضغط موجب)؛ (b): الصمام في بداية الأنابيب الهابط (ضغط سالب)؛
 (c): تغير الضغط في الحوز السفلي للأنبوب (downstream) مع وبدون وجود جهاز التحكم؛
 (d): تغير الضغط في الحوز العلوي للأنبوب (upstream) مع وبدون وجود جهاز الحماية من الصدمة.



الشكل (4): النظام الهيدروليكي لتحكم بالصدمة الهيدروليكية:

(a): الصمام في نهاية الأنبوب (ضغط موجب)؛ (b): الصمام في بداية الأنبوب الهابط (ضغط سالب)؛

(c): النموذج التجريبي؛

(d): تغير الضغط في الحوز السفلي (downstream) مع وبدون وجود جهاز التحكم؛

(e): تغير الضغط في الحوز العلوي (upstream) مع وبدون وجود جهاز التحكم.

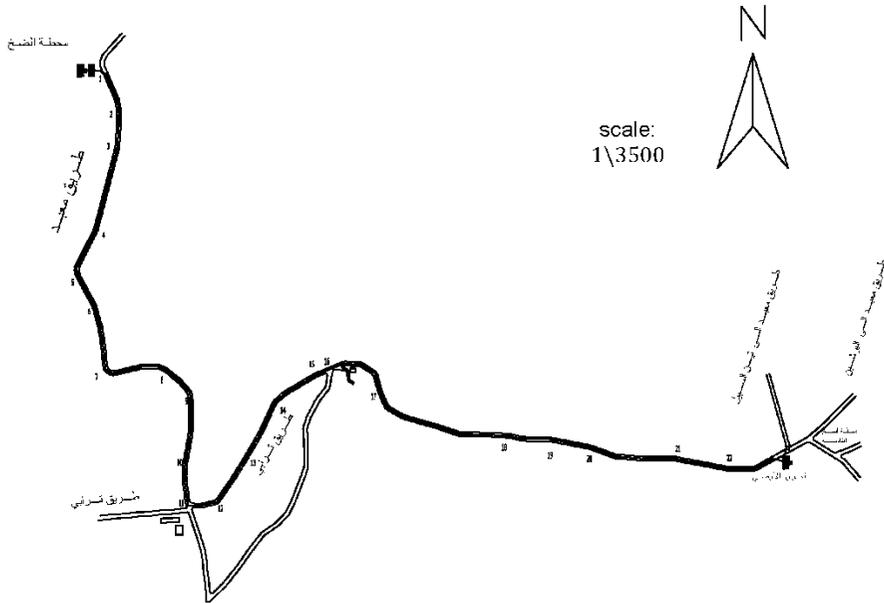
2- منطقة الدراسة والبيانات

تتبع قرية عين السودة لمحافظة حمص، وتبعد (60 كم) عن مدينة حمص، ويتكون خط ضخ قرية عين السودة من مرحلتي ضخ:

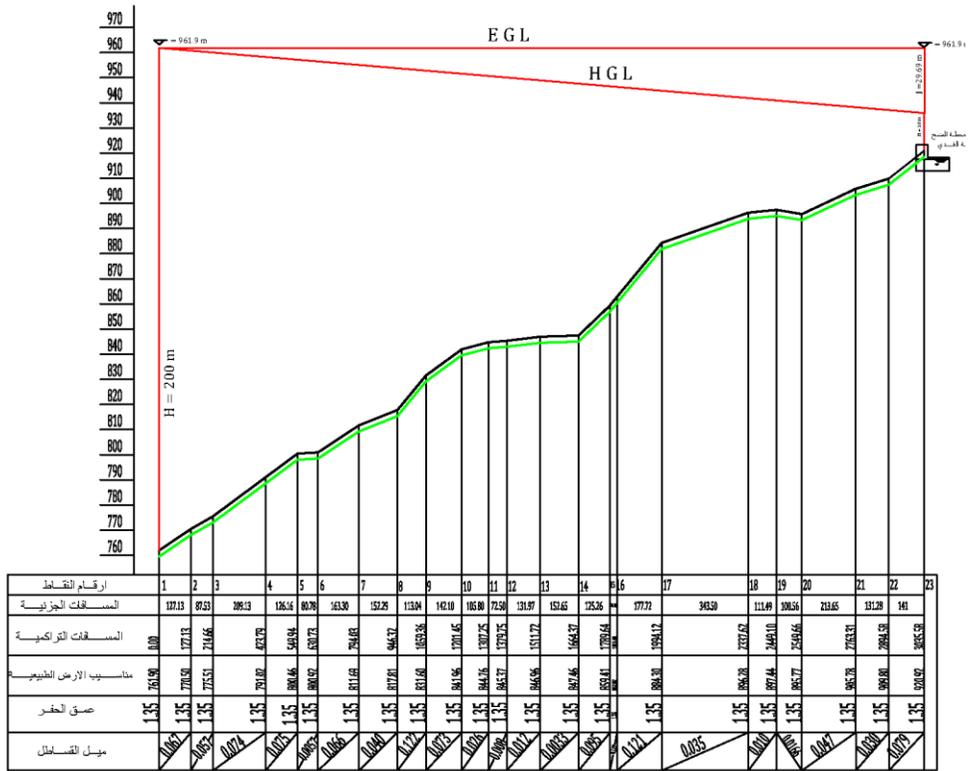
الأولى يتم فيها ضخ المياه من ثلاث آبار إلى خزان تجميعي منسوب الماء فيه (764 m)، والثانية يعاد فيها ضخ المياه من الخزان التجميعي إلى خزان أرضي على منسوب (922m) يقع في منطقة برشين، وهي الحالة المدروسة، يبين الشكل (5) و(6) و(7) صورة فضائية لموقع خط الضخ عين السودة، وتفاصيل تضاريس المنطقة وخط الضخ (مقطع طولي، مسقط أفقي) مأخوذة من الرفع المساحي للمؤسسة العامة لمياه الشرب والصرف الصحي في حمص. والذي قمنا بتمثيلة في نموذج تخطيطي ضمن برنامج (AFT Impulse) كما هو موضح بالشكل (8).



الشكل (5): صورة جوية تبين المرحلة الأولى من خط ضخ عين السودة.

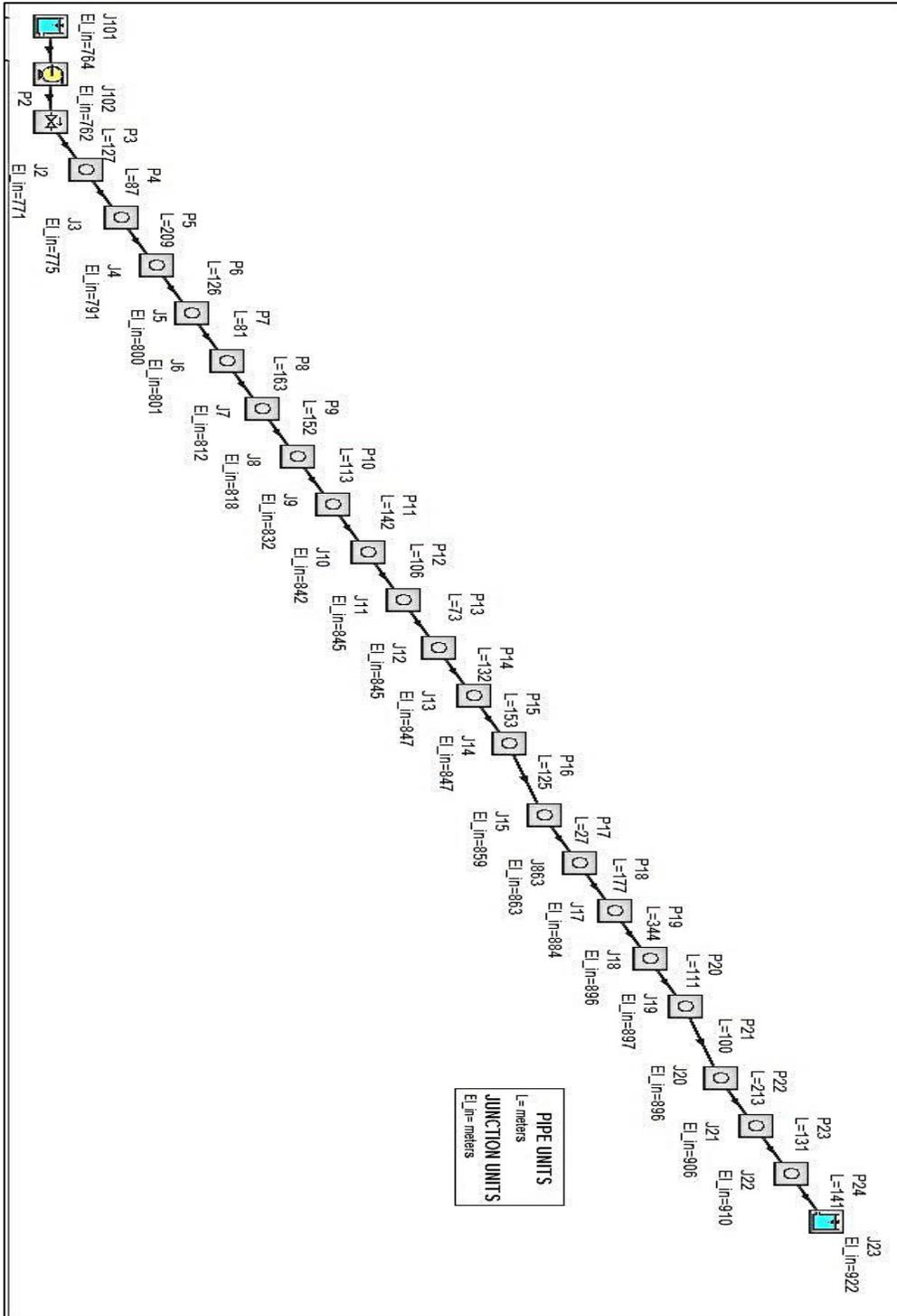


الشكل (6): مسقط أفقي لخط ضخ عين السودا مأخوذ من الرفع المساحي للمؤسسة العامة لمياه الشرب بحمص.



الشكل (7): مقطع طولي لخط ضخ عين السودا مأخوذ من الرفع المساحي للمؤسسة العامة لمياه الشرب بحمص.

حماية خط ضخ عين السودة من الصدمة الهيدروليكية بطريقة التطعيم



الشكل (8): نموذج تخطيطي لمقطع طولي في خط ضخ عين السودة ضمن برنامج AFT Impulse

يبين الجدول (1) المواصفات الفيزيائية والهيدروليكية لخط الضخ في المرحلة الثاني، كما يوضح الجدول (2) المواصفات الفيزيائية للماء المضخوخ عبر الأنبوب المدروس.

الجدول (1): مواصفات خط ضخ عين السودة.

فونت	مادة الأنبوب
150 mm	القطر الاسمي
10 mm	ثخانة جدران الأنبوب
3055 m	الطول
8.231×10^9 Pascal	معامل المرونة
0.211	معامل بواسون
0.122 mm	الخشونة المطلقة
0.03~0.12	الميل الطولي
70 m ³ /hour	التصريف
1.1 m/sec	سرعة الجريان (الحالة المستقرة)
25 bar	الضغط الاسمي للبولي ايتيلين
40 bar	الضغط الاسمي للفونت
15.8 bar	الضاغط الناتج عن فرق المنسوب

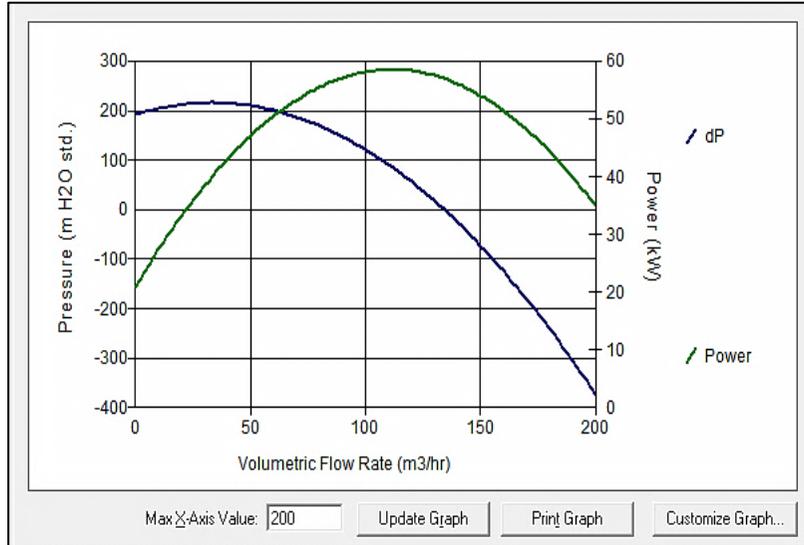
الجدول (2): مواصفات السائل المضخوخ في خط ضخ عين السودة.

25 °C	درجة حرارة الماء
997.17 Kg/m ³	الكثافة
2.076×10^9 Pascal	معامل المرونة
0.03179 bar	ضغط التبخر
1229 m/sec	سرعة الموجة أثناء الصدمة الهيدروليكية

استخدمت مضخة أفقية يمكن توضيح مواصفاتها الهيدروليكية من خلال الجدول (3)، والخطوط المميزة للمضخة ضمن بيئة البرنامج كما هو موضح بالشكل (9).

الجدول (3): مواصفات المضخة في خط ضخ عين السودة.

النوع:	مضخة نابذة أفقية
سرعة الدوران الاسمية	1500 rpm
عطالة المضخة	$I_p = 1.5 * 10^7 * \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0.9556}$
عطالة المحرك	$I_m = 118 * \left(\frac{P}{N}\right)^{1.48}$



الشكل (9): المنحني المميز للمضخة (Q~H)، منحني الطاقة (Q~dP)؛ خط ضخ عين السودة.

3- أهداف البحث

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل خط ضخ من مادة الفونت قرية عين السودة باستخدام برنامج (AFT Impulse) وذلك لـ:

1. تحديد نسبة التطعيم الأمثلية بمادة البولي إيثيلين للتخفيف ما أمكن من قيم الضغوط الإضافية الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية.

2. تحديد الموقع الأمثل لنسبة التطعيم المختارة على طول خط الضخ.

3. إجراء مقارنة للجدوى الاقتصادية وتحديد الخيار الأمثل.

4- طرائق البحث ومواده

الحالة العابرة (Transient) في أنظمة الضخ حتمية الحدوث وعادة تكون أشد ما يمكن بالقرب من محطة الضخ، صمامات التحكم، النقاط عالية المنسوب في النظام، الأماكن منخفضة الضغط في النظام، والأماكن البعيدة عن الخزانات العالية في أنظمة الأسالة (Friedman, M; et al 2003).

الحالة الأكثر خطورة وشيوعاً لحدوث الحالة العابرة هي توقف المضخة المفاجئ والنتائج في أغلب الأحيان عن انقطاع التيار الكهربائي حيث يؤدي إلى هبوط سريع للضغط وإلى قيم أقل من الضغط الجوي فإذا وصل انخفاض الضغط إلى ضغط البخار ستنشأ تجاويف البخار ويحدث ما يسمى "التكهف". حيث إن التكاثر السريع لبخار الماء الموجود في هذه التجاويف ينتج عنه ارتفاع كبير وسريع في الضغط والذي يسبب ضرراً خطيراً للنظام الهيدروليكي والأجهزة الملحقة به.

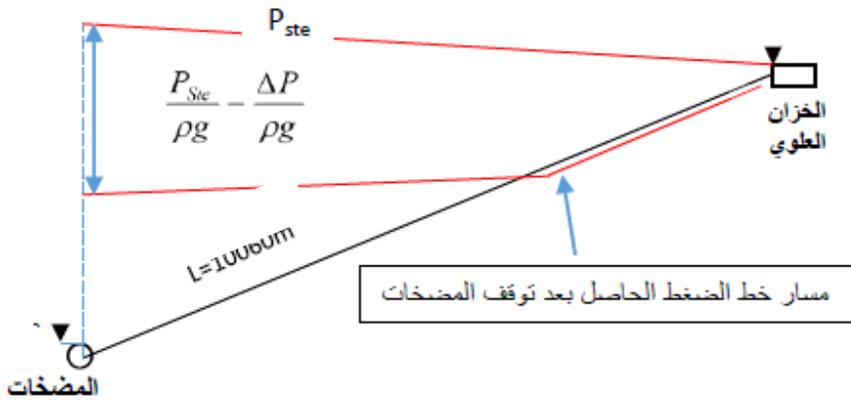
4-1 الصدمة الهيدروليكية الناتجة عن التوقف المفاجئ للمضخة:

إن المقطع الطولي للأنبوب عبارة عن مستقيم يصل بين المضخة والخزان العلوي، كما في الشكل (10)، أثناء عمل المضخة يكون خط الضغط موافق للحالة المستقرة (P_{ste})، ونتيجة الصدمة الناتجة عن التوقف المفاجئ للمضخة، ينخفض الضغط بمقدار (ΔP)، حيث (ΔP): قيمة انخفاض الضغط الناتج عن الصدمة خلال زمن جزئي قدره Δt والمحسوب من علاقة جوكوفسكي (معلا، معلا 2014):

$$\Delta P_t = \rho \cdot C \cdot \Delta v_t \dots \dots (1)$$

حيث: Δv_t : الانخفاض الذي يطرأ على السرعة خلال زمن جزئي قدره Δt & C : سرعة موجة الصدمة (m/sec) & ρ : الكتل النوعية للماء (الكثافة) وتؤخذ تقريباً $(1000 kg/m^3)$.

ينخفض خط الضغط عن القيمة الموافقة للحالة المستقرة بمقدار $(\Delta P/\rho.g)$ ، وانخفاض الضغط يتحرك على شكل موجة تعبر الأنبوب إلى نهايته، وموجة الضغط تصل إلى نهاية الأنبوب خلال زمن قدرة $(T = L/C)$ ، ثم تتردد بقيمة موافقة للحالة المستقرة، وتصل إلى بداية الأنبوب في الزمن $(2L/C)$ ، وهو يمثل الزمن الدوري للصدمة.



الشكل (10): المقطع الطولي للأنبوب.

2-4 العوامل الأساسية المؤثرة في الصدمة الهيدروليكية:

ذكر (Jones, G. M; et al 2006) العوامل المؤثرة في الصدمة الهيدروليكية وفق الآتي:

1. مواصفات الأنبوب (الطول، القطر، سماكة الجدران، الخشونة النسبية، مادة الصنع)
2. مواصفات الجريان (التدفق، السرعة، الضغط).
3. مواصفات السائل المستخدم (الكثافة، المرونة، اللزوجة، احتواء السائل على الهواء والعوالق الصلبة).
4. الأسباب الحدية للصدمة (هل تبدأ الموجة بارتفاع أو انخفاض في الضغط).

5. طريقة تثبيت الأنابيب.

6. شكل المقطع الطولي للأنبوب.

من خلال معادلة سرعة انتشار موجة الضَّغَط في الأنابيب (قدسية & الغدا 2016):

$$C_p = \frac{\sqrt{\frac{E_w}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_w}{E_R} * \frac{D}{e} * M}} \dots \dots \dots (2)$$

حيث: C_p : سرعة موجة الصدمة (m/sec) & D : قطر الأنبوب الخارجي (m) & e : ثخانة الأنبوب (m) & E_w : معامل مرونة الماء ويقدر بـ $(2.07 * 10^9 Pa)$ & E_R : معامل مرونة المادة & ρ : الكتل النوعية للماء (الكثافة) وتؤخذ $(1000 kg/m^3)$ من أجل درجة حرارة للماء 4 درجة مئوية.

M : ثابت التثبيت من أجل $(\frac{D}{e} > 40)$ ويؤخذ (جرجي، عادل 2011):

- $(M = 1.25 - \mu)$ التثبيت من جهة واحدة للأنبوب.
- $(M = 1 - \mu^2)$ التثبيت الكامل للأنبوب من جهتين.
- $(M = 1.25 - \mu)$ الأنبوب غير مثبت (فواصل تمدد).

μ : معامل بواسون ويساوي 0.45 لأنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE).

توصلت (قدسية & الغدا 2016) إلى أن:

1. قطر الأنبوب يوجد في مخرج المعادلة (2) في شكل علاقة عكسية مع السرعة، وبالتالي سوف تزداد قيمة الضغط لأعظمي الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية مع الأقطار الصغيرة والعكس صحيح.
2. أن زيادة ثخانة جدران الأنبوب (e) يرافقها زيادة في سرعة موجة الضَّغَط (C_p) وكذلك زيادة في قيم الضغوط الأعظمية الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية.

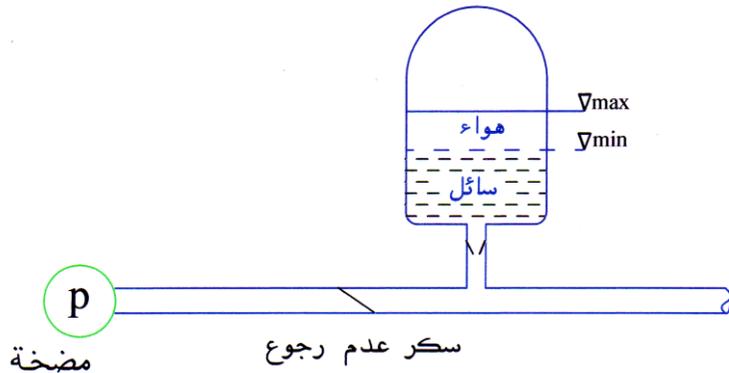
3. بالعودة إلى المعادلة (2) التي تأخذ معامل مرونة الأنبوب أو ما يسمى معامل يونغ (E_R) (معامل مرونة مادة الأنبوب) بعين الحساب نرى أنه كلما قل معامل المرونة، قلت سرعة انتشار موجة الضَّغَط وبالتالي فسوف تقل قيم الضغوط الأعظمية الناجمة عن الصدمة الهيدروليكية.

وأشار (سابا؛ نخلة 2016) أن العلاقة الحسابية (2) لسرعة انتشار الصدمة الهيدروليكية هي علاقة نظرية لا تأخذ بعين الاعتبار العوامل الأخرى ذات التأثير المحسوس أحياناً، كظروف تثبيت الأنابيب وعملها المشترك مع التربة المحمية أو القمصان البيتونية المغلفة لها والذي يؤدي إلى وجود فروقات بن القياسات الحقلية ونتائج المحاكاة التي تعتمد الطريقة الكلاسيكية MOC.

3-4 خزان للهواء المضغوط (GAS Accumulator)

• توصيف خزان الهواء المضغوط:

يتألف خزان الضغط من وعاء يحتوي على غاز مضغوط في جزئه العلوي (عادة يكون هواء) وسائل في جزئه السفلي، يوضع هذا الخزان عند طرف دفع المضخة وبعد سكر عدم الرجوع مباشرة كجهاز حماية للمضخة من الصدمة الهيدروليكية كما هو موضح بالشكل (11). يصنع عادة من الفولاذ المرن ومغلق من الطرفين بواسطة أغطية فولاذية مدببة الشكل ومحمولة إما على قواعد فولاذية أو بيتونية.



الشكل (11): خزان الهواء المضغوط (جرجي؛ إبراهيم 2009)

• آلية عمل الخزان:

عند توقف المضخة بسبب انقطاع التيار الكهربائي يعمل سكر عدم الرجوع (لأن المضخة لم تعد تعطي ضغطاً)، فيخرج قسم من مياه الخزان إلى الأنبوب الذي حدث فيه انخفاض في الضغط بسبب حدوث صدمة هيدروليكية. وبذلك يقوم الخزان بتغذية الأنبوب لمنع حدوث انخفاض في الضغط يصل لقيمة التكيف وبذلك يتم امتصاص انخفاض الضغط.

وبعد تناقص تدريجي لسرعة الماء في الأنبوب ثم انعدامه، يعود ماء الأنبوب إلى الوراها ويدخل الخزان مما يزيد الضغط فيه وفي الأنبوب، وبذلك يخفف من ارتفاع الضغط باستيعابه جزءا من مياه الأنبوب.

4-4 استخدام برنامج (AFT Impulse) في نمذجة الصدمة الهيدروليكية:

هو عبارة عن أداة محاكاة حاسوبية لجران السوائل المضغوطة داخل شبكات الأنابيب خلال كل من الحالة المستقرة (Steady) و العابرة (Transient) مع إمكانية ادخال تأثير كل الأجهزة الملحقة بالنظام والأجهزة المستخدمة للتخفيف من الآثار الناتجة عن الحالة العابرة، وبالتالي تحديد الخيار الأفضل للتخفيف من قيم الضغط الناتج عن الصدمة الهيدروليكية، وهو يستخدم طريقة نيوتن رافسون (Newton-Raphson) لحل المعادلات الأساسية للجران المتعلقة بتوازن الكتلة وكمية الحركة، ويقوم البرنامج باستخدام طريقة الخواص (Method of Characteristics) لحل وحساب الصدمة الهيدروليكية. ويذكر رئيس مهندسي شركة KSB لصناعة المضخات أن استخدام برنامج حاسوبي يعتمد على طريقة الخواص سيعطي نتائج دقيقة إلى حد بعيد وهذه الطريقة تم معايرتها بإجراء الكثير من القياسات العملية ومقارنتها بالنتائج الحاسوبية.

5- النتائج والمناقشة

تم إدخال البارامترات الأساسية للأنابيب والمضخة والسائل ضمن بيئة برنامج (AFT Impulse)، ونمذجة حالة التوقف المفاجئ للمضخة (توقف مع عطالة ذاتية بوجود سكر عدم رجوع Check Value)، وحصلنا على نتائج تغيرات الضغط الأعظمي والأصغري في الحالة المستقرة والحالة العابرة في أجزاء الأنابيب (P_i) المكونة لخط الضخ.

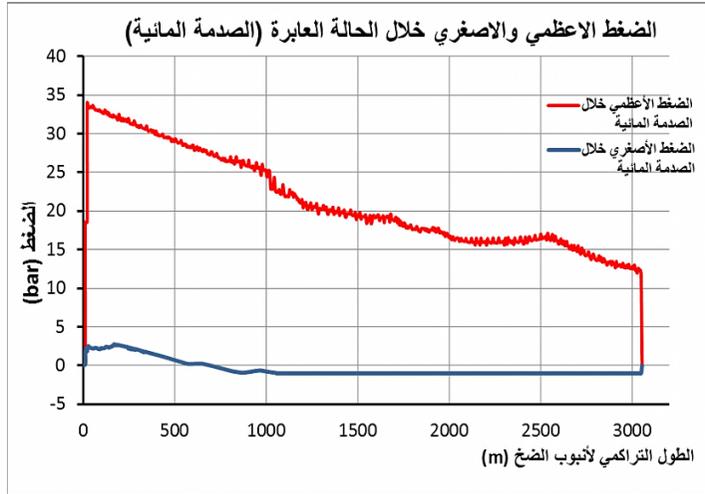
- قيمة الضغط الأعظمي بحسب جكوفسكي:

$$\Delta P = \rho * C * V = 997.17 * 1229 * 1.1 = 1348074.12 \frac{N^2}{m} = 13.48 \text{ bar}$$

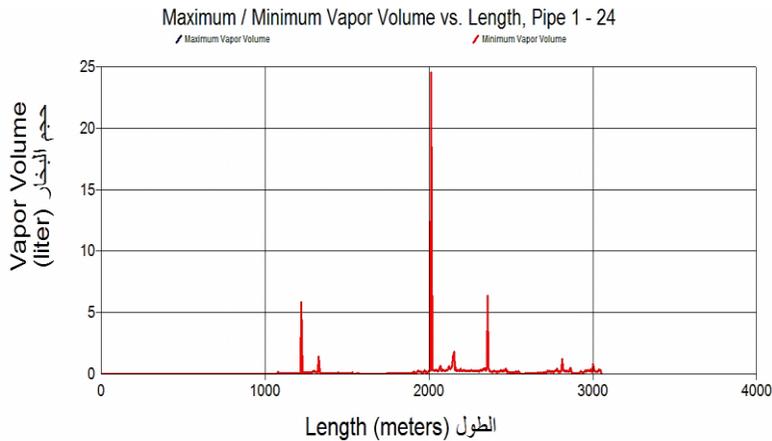
$$P_{max} = \Delta P + P_{ST} = 13.48 + 15.8 = 29.28 \text{ bar}$$

ولكن بحسب النتائج الحسابية للنموذج والتي يمكن توضيحها من خلال الشكل (12) نلاحظ أن الضغط الأعظمي P_{max} يتجاوز (34 bar). والسبب هو تشكل وانصعاق بخار الماء حيث أن الضغط الأصغري وصل إلى ضغط التبخر على طول أنبوب الضخ بعد توقف المضخة، وبلغ قيمة حجمية أعظمية مساوية لحوالي (25 Liter) كما هو موضح بالشكل (13). الضغط الإضافي (P_C) الناتج عن تبخر الماء وانصعاقه يمكن حسابه بالعلاقة:

$$P_C = P_{max} - (\Delta P + P_{ST}) = 34.01 - 29.28 = 4.73 \text{ bar}$$



الشكل (12): الضغط الأعظمية والأصغرية على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية بدون خزان حماية.



الشكل (13): حجم بخار الماء المتشكل على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية.

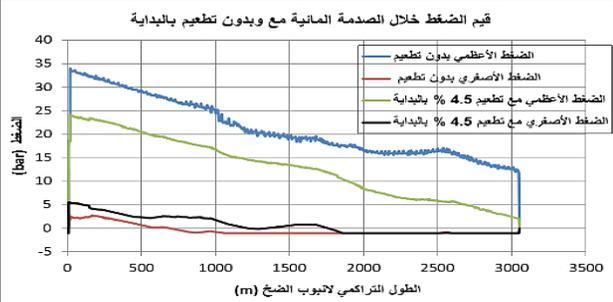
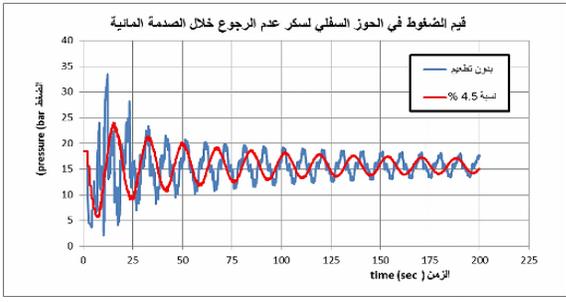
وفيما يلي بدراسة تأثير تطعيم أنبوب الضخ في موقعين (البداية _ المنتصف) وإيجاد العلاقة الرياضية الرابطة بين نسبة التطعيم ونسبة انخفاض الضغط الأعظمي عن قيمته بدون تطعيم.

5-1 سيناريوهات تطعيم أنبوب الضخ في بدايته

تم دراسة تطعيم أنبوب الضخ في بدايته بنسب متعددة % (4.5, 7, 14, 18, 21) بأنايب من البولي إيثيلين ودراسة تغيرات الضغط الناجمة في حالة الصدمة، كما هو موضح في الجدول (4).

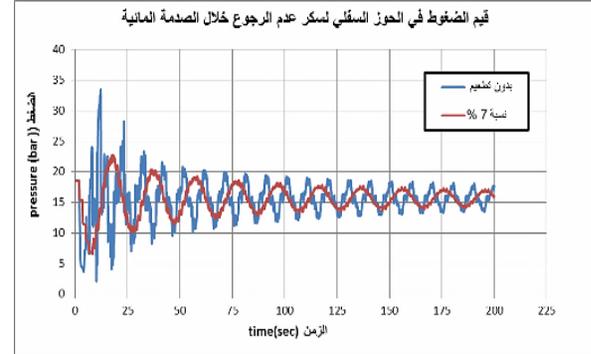
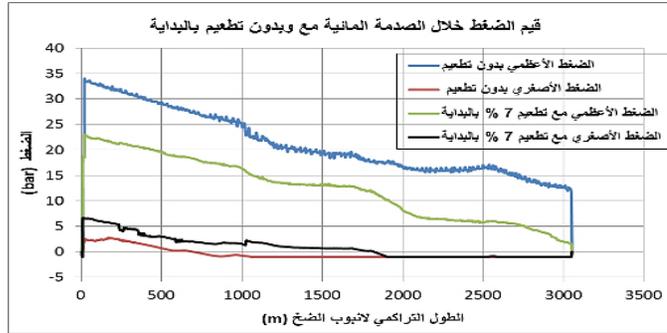
حماية خط ضخ عين السودة من الصدمة الهيدروليكية بطريقة التطعيم

الجدول (4): تغيرات الضغط في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع وعلى كامل خط الضخ.

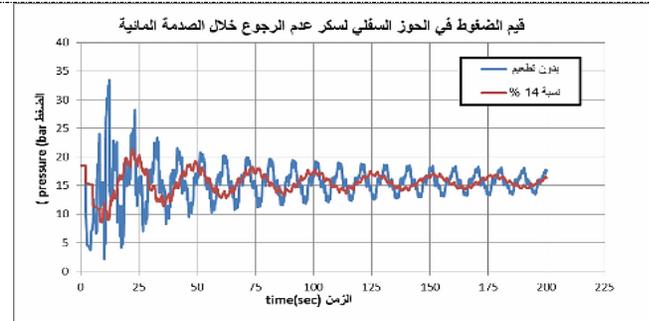
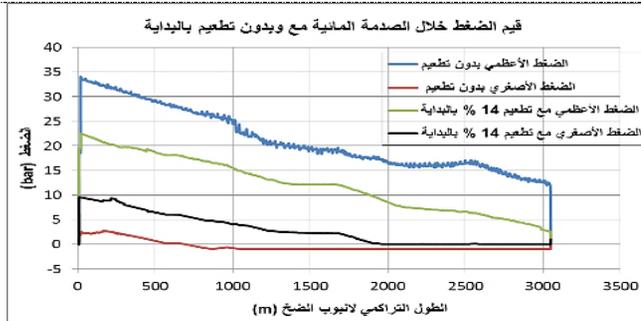
قيم الضغط الأعظمية والأصغرية (bar) على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية	قيم الضغط (bar) في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع مع وبدون تطعيم في بداية الأنبوب
<p>السيناريو الأول: التطعيم بنسبة (4.5 %) في بداية أنبوب الضخ</p>  <p>قيم الضغط خلال الصدمة المائية مع وبدون تطعيم بالبداية</p> <p>الضغط الأعظمي بدون تطعيم الضغط الأصغري بدون تطعيم الضغط الأعظمي مع تطعيم 4.5 % بالبداية الضغط الأصغري مع تطعيم 4.5 % بالبداية</p> <p>الضغط (bar)</p> <p>الطول التراكمي لانبوب الضخ (m)</p>	<p>السيناريو الثاني: التطعيم بنسبة (7 %) في بداية أنبوب الضخ</p>  <p>قيم الضغوط في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع خلال الصدمة المائية</p> <p>بدون تطعيم نسبة 4.5 %</p> <p>الضغط (bar)</p> <p>الزمن (sec)</p>

قيم الضغط الأعظمية والأصغرية (bar) على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية

قيم الضغط (bar) في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع مع وبدون تطعيم في بداية الأنبوب



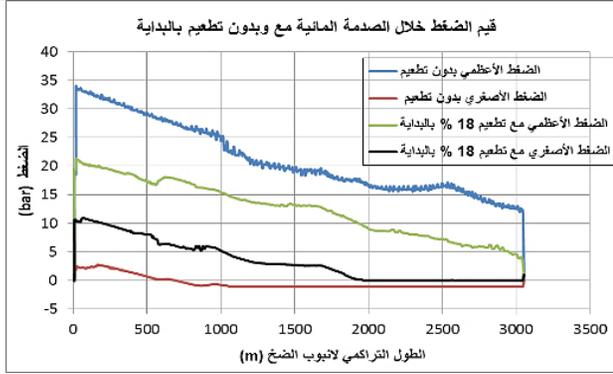
السيناريو الثالث: التطعيم بنسبة (14 %) في بداية أنبوب الضخ



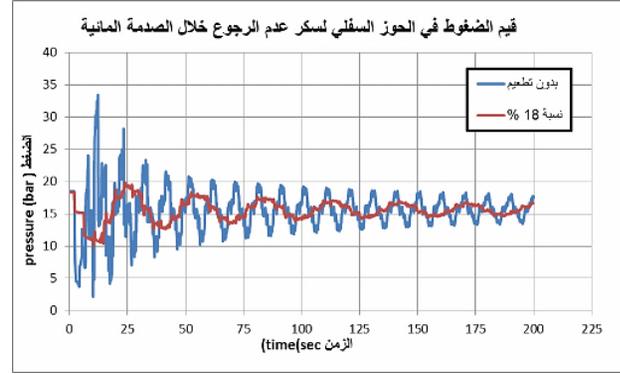
السيناريو الرابع: التطعيم بنسبة (18 %) في بداية أنبوب الضخ

حماية خط ضخ عين السودة من الصدمة الهيدروليكية بطريقة التطعيم

قيم الضغط الأعظمية والأصغرية (bar) على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية



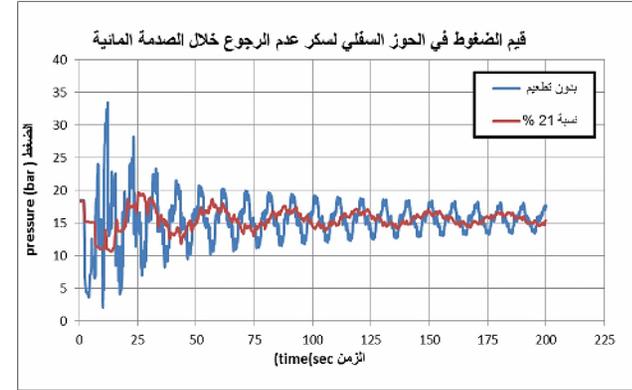
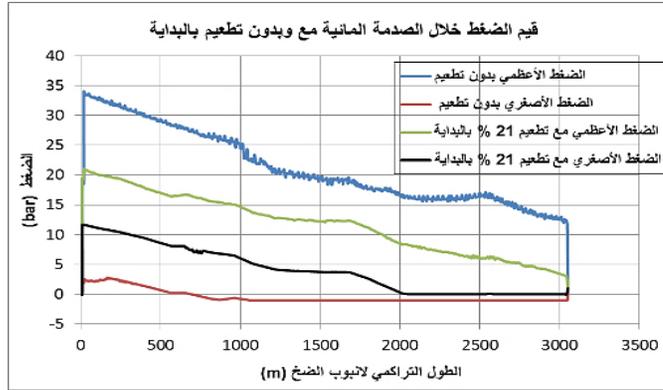
قيم الضغط (bar) في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع مع وبدون تطعيم في بداية الأنبوب



السيناريو الخامس: التطعيم بنسبة (21 %) في بداية أنبوب الضخ

قيم الضغط الأعظمية والأصغرية (bar) على طول خط ضخ عين السودة خلال الصدمة الهيدروليكية

قيم الضغط (bar) في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع مع وبدون تطعيم في بداية الأنبوب

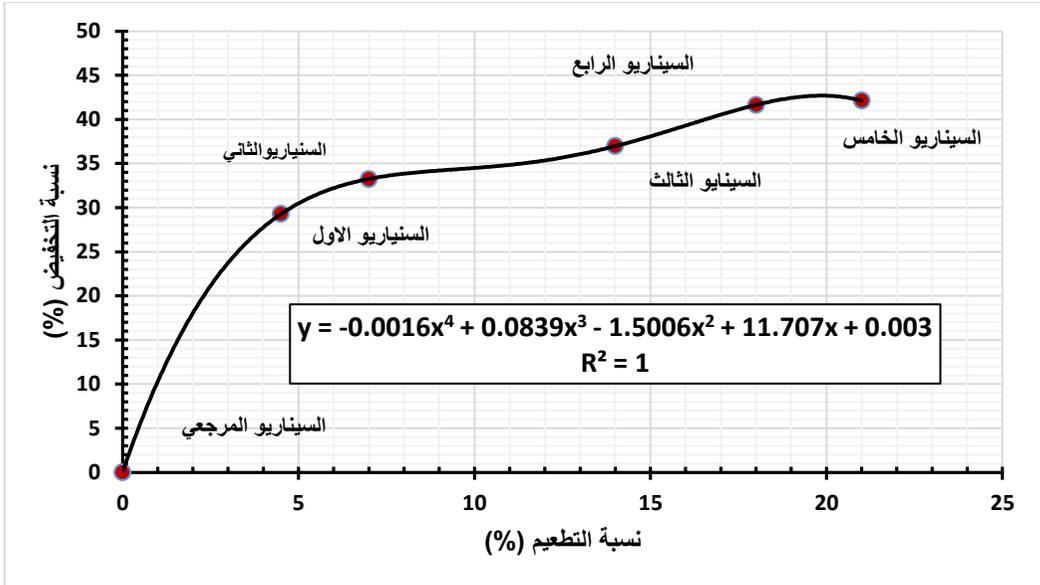


بإجراء مقارنة بين قيم الضغوط الأعظمية في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع خلال الصدمة الهيدروليكية بدون تطعيم ومع تطعيم بنسب مختلفة (4.5, 7, 14, 18, 21) في بدايته بأنابيب من البولي ايتيلين كما هو موضح في الجدول (5)، وحساب نسبة التخفيض في الضغط الأعظمي في السيناريو المرجعي المتمثل باستخدام أنبوب ضخ من الفونت، يمكن أن نستنتج أن:

- التطعيم بنسبة (14%) في بداية خط الضخ يعطي نتائج جيدة في تخميد الصدمة الهيدروليكية، لأنه عند هذه النسبة اختفى بخار الماء المتشكل، وانخفضت قيمة الضغط الأعظمي في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع حتى (21.43 bar) (أقل من الضغط الاسمي للأنبوب 25 bar)، وذلك بنسبة (36.99 %) وعند زيادة النسبة لوحظ تغير طفيف في نسبة الانخفاض في السيناريو الرابع والخامس.

الجدول (5): مقارنة نتائج الضغط الأعظمي في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع (حالة تطعيم بداية الأنبوب).

حجم بخار الماء المتشكل (liter)	الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع		نسبة التطعيم في بداية الأنبوب (%)	السيناريو
	نسبة التخفيض في الضغط عن السيناريو المرجعي (%)	الضغط الأعظمي (bar)		
25	0	34.01	بدون تطعيم	المرجعي
0.83	29.29	24.05	4.50	الأول
0.15	33.23	22.71	7.00	الثاني
0.008	36.99	21.43	14.00	الثالث
--	41.63	19.85	18.00	الرابع
--	42.13	19.68	21.00	الخامس



الشكل (14): نسبة تطعيم بداية أنبوب الضخ مع نسبة التخفيض الضغط في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع.

العلاقة التي تربط بين نسبة انخفاض الضغط والتطعيم هي معادلة من الدرجة الرابعة، وأن ميل المنحني يكون كبيراً حتى نسبة التطعيم (6%)، ثم تقل قيمة الميل بعد هذه القيمة، وتعود للتزايد بشكل خفيف بعد النسبة (13%)، الشكل (14).

5-2 سيناريوهات تطعيم أنبوب الضخ في منتصفه

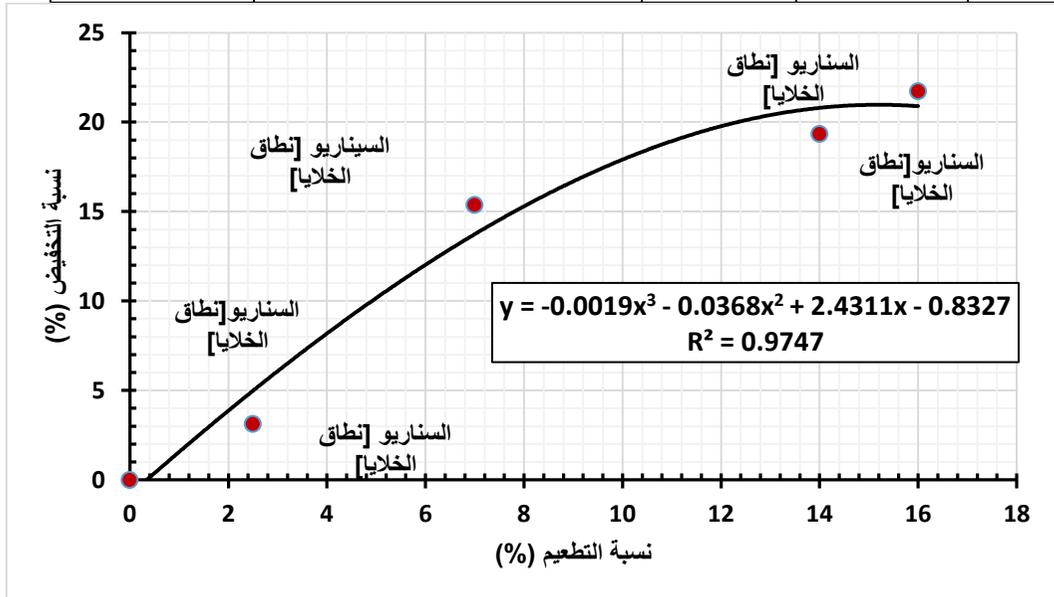
تم دراسة تطعيم أنبوب الضخ في منتصفه بنسب متعددة (2.5, 7, 14, 16) بأنايب من البولي إيثيلين، ودراسة تغيرات الضغط الناجمة في حالة الصدمة وفق السيناريوهات المقترحة، وحساب نسبة التخفيض في الضغط الأعظمي في السيناريو المرجعي المتمثل باستخدام أنبوب ضخ من الفونت كما هو موضح في الجدول (6)، والتوصل إلى الآتي:

- تبين أن التطعيم بنسبة (16 %) في منتصف خط الضخ تعطي نتائج جيدة في تخميد الصدمة الهيدروليكية، لأنه عند هذه النسبة بلغت قيمة بخار الماء المتشكل (2.5 liter)، وانخفضت قيمة الضغط الأعظمي في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع حتى (26.62bar) (أكبر من الضغط الاسمي للأنبوب 25 bar)، وذلك بنسبة (21.73%)،

أي أن تطعيم منتصف الأنبوب لنسبة (16%) لم يستطع حماية خط الضخ بشكل جيد حيث ارتفع الضغط إلى ما يزيد عن (25 bar).

الجدول (6): مقارنة نتائج الضغط الأعظمي في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع (حالة تطعيم منتصف الأنبوب)

حجم بخار الماء المتشكل (liter)	الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع		نسبة التطعيم في منتصف الأنبوب (%)	السيناريو
	نسبة التخفيض في الضغط عن السيناريو المرجعي (%)	الضغط الأعظمي (bar)		
25	0	34.01	بدون تطعيم	المرجعي
16	3.12	32.95	2.5	السادس
5.5	15.38	28.78	7	السابع
5.5	19.35	27.43	14	الثامن
2.5	21.73	26.62	16	التاسع



نلاحظ من الشكل (13) أن العلاقة التي تربط بين نسبة انخفاض الضغط والتطعيم هي معادلة من الدرجة الثالثة، كما أن ميل المنحني المعبر عن العلاقة يكون كبيراً حتى نسبة التطعيم (12%)، ثم تقل قيمة الميل بعد هذه القيمة.

3-5 دراسة تأثير تطعيم جزء من خط الضخ على حجم خزان الضغط المضاف للشبكة
قمنا بإجراء عدة سيناريوهات لتبيان تأثير تطعيم جزء من خط الضخ على حجم خزان الضغط المضاف للشبكة والنتائج موضحة في الجدول (7).

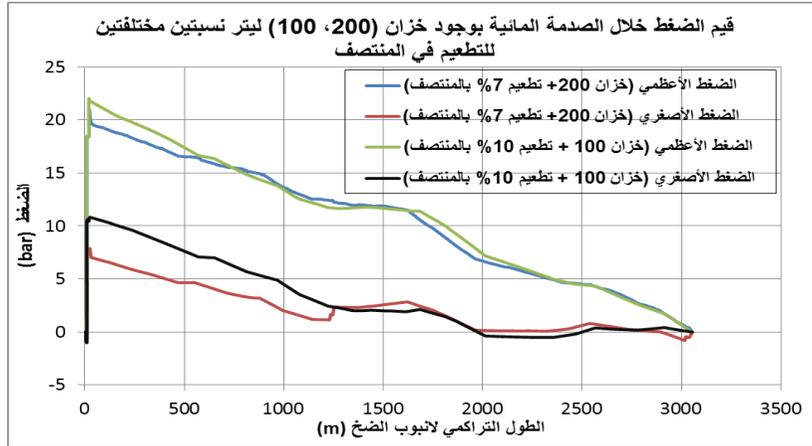
الجدول (7): مقارنة نتائج الضغط الأعظمي في الحوز السفلي لسكر عدم الرجوع
خزان 500 liter & خزان 200 liter + تطعيم 7% في بداية & منتصف الأنبوب).

السياريو	التوصيف	الضغط الأعظمي (bar)	نسبة التخفيض في الضغط (%)	حجم بخار الماء المتشكل (liter)
المرجعي	بدون خزان وتطعيم للأنبوب	34.01	0	25
العاشر	خزان بحجم 500 ليتر	19	44.13	0
الحادي عشر	خزان بحجم 200 ليتر	25	26.49	9
الثاني عشر	خزان بحجم 200 ليتر + تطعيم 7% في بداية الأنبوب	20	41.19	0.023
الثالث عشر	خزان بحجم 200 ليتر + تطعيم 7% في منتصف الأنبوب	20	41.19	0
الرابع عشر	خزان بحجم 100 ليتر + تطعيم 10% في بداية الأنبوب	19	44.13	0
الخامس عشر	خزان بحجم 100 ليتر + تطعيم 10% في منتصف الأنبوب	22	35.31	0

نلاحظ أن زيادة نسبة التطعيم في منتصف الأنبوب حتى (10 %) مع تصغير حجم خزان الهواء المضغوط حتى (100 liter) أعطت نتائج مقاربة مع حالة التطعيم بنسبة (7%) واستخدام خزان بحجم (200

حماية خط ضخ عين السوده من الصدمة الهيدروليكية بطريقة التطعيم

liter) بالنسبة للضغوط الأعظمية على كامل خط الضخ، مع ملاحظة رفع الضغوط السالبة في الجزء الأول من الأنبوب وإمكانية تشكل بخار الماء بكمية ضئيلة لا تصل إلى حد التكيف في الجزء الأخير من الأنبوب، مما يتيح إمكانية تصغير حجم الخزان وزيادة نسبة التطعيم، الشكل (16).



الشكل (16): قيم الضغوط المتشكلة على طول الأنبوب خلال الصدمة الهيدروليكية (خزان + 100 liter + تطعيم 10% & 7% في منتصف الأنبوب).

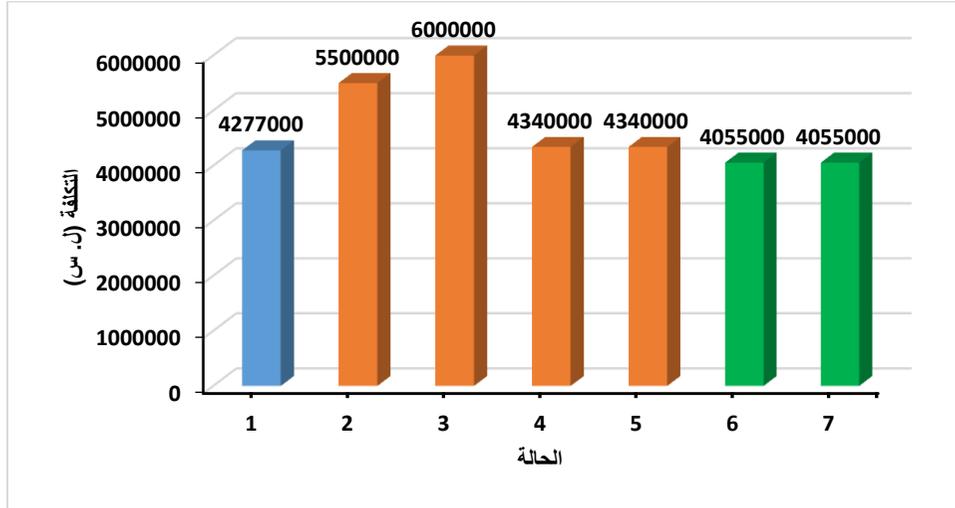
الدراسة الاقتصادية للسيناريوهات الناجحة:

تم حساب تكلفة الحلول باعتماد أسعار الكشوف التقديرية في المؤسسة العامة لمياه الشرب والصرف الصحي لعام 2019م، وباعتبار تكلفة استبدال المتر الطولي من أنبوب الضخ 10000 ل.س، كما هو موضح بالجدول (8).

الجدول (8): التكلفة المادية للسيناريوهات الناجحة

الحالة	الحالة الناجحة	تكلفة استبدال الأنبوب (ل.س)	تكلفة خزان الضغط (ل.س)	مجموع التكلفة (ل.س)
1	تطعيم بنسبة (14%) في البداية	4277000	0	4277000
2	تطعيم بنسبة (18%) في البداية	5500000	0	5500000
3	خزان (500 liter) وبدون تطعيم	0	6000000	6000000
4	خزان (200 liter) مع تطعيم (7%) في البداية	2140000	2200000	4340000
5	خزان (200 liter) مع تطعيم (7%) في المنتصف	2140000	2200000	4340000

الحالة	الحالة الناجحة	تكلفة استبدال الأنبوب (ل.س.)	تكلفة خزان الضغط (ل.س.)	مجموع التكلفة (ل.س.)
6	خزان (100 liter) مع تطعيم (10%) في البداية	3055000	1000000	4055000
7	خزان (100 liter) مع تطعيم (10%) في المنتصف	3055000	1000000	4055000



الشكل (17): التمثيل البياني للدراسة الاقتصادية للحلول الناجحة.

نلاحظ من خلال المقارنة الاقتصادية الموضحة في الشكل (17) والمقارنة الهيدروليكية التصميمية السابقة أن أفضل الحلول كان التطعيم بنسبة (10 %) (بالبداية أو المنتصف) مع استخدام خزان صغير بحجم (100 liter) ومن ثم يليها بفارق بسيط التطعيم بنسبة (14%) في بداية خط الضخ.

6- الاستنتاجات والتوصيات

6-1 الاستنتاجات:

- تبين من خلال دراسة تطعيم خط ضخ عين السودة في موقعين (البداية - المنتصف) أن مكان التطعيم أثر في انخفاض قيم الضغوط الأعظمية فكلما كان مكان التطعيم أقرب

إلى الجهاز المسبب للصدمة الهيدروليكية (المضخة) كان له أثر أكبر في تخفيض قيم الضغوط العالية الناتجة عنها وكلما زادت نسبة التطعيم ارتفعت قيم انخفاض الضغط الأعظمي.

- إن تطبيق عملية التطعيم بأنابيب البولي إيثيلين عالي الكثافة ذو الانضغاطية العالية نسبةً للفونت المرن والحديد كان له أثر كبير في التخفيض من حجم بخار الماء بشكل موضعي في مكان التطعيم كما حدث عند تطعيم الخط في منتصفه حيث تصادف مكان التطعيم بمنطقة انخفاض للضغط تصل لحد التبخر.
- إن إضافة خزان ضغط للمنظومة وبحجم كافي استطاع حماية خط الضخ بشكل كامل من ارتفاع وانخفاض الضغط الناتج عن الصدمة الهيدروليكية ولكن هذا الحل مكلف اقتصادياً.
- المقارنة الاقتصادية للسيناريوهات الأفضل هيدروليكيًا في حماية خط الضخ أكدت على أفضلية عملية التطعيم بدل من شراء وتركيب خزان ضغط كبير الحجم وإن الحل الأمثل والأقل تكلفة هو خزان صغير مع تطعيم بنسبة 10 % ويمكن عن طريق زيادة نسبة التطعيم الاستغناء عن تركيب خزان الضغط بحال عدم توفره بسبب مشاكل الاستيراد.

6-2 التوصيات:

- توصي الدراسة بتطبيق طريقة تطعيم خطوط الضخ المصنعة من الفونت المرن والحديد بأنابيب من البولي إيثيلين عالي الكثافة لحمايتها من ظاهرة الصدمة الهيدروليكية لما لها من أثر في تخفيض التكلفة المادية للمشاريع بدل من شراء وتركيب خزانات الضغط عالية الثمن والتي يوجد بعض الصعوبات في استيرادها حالياً.
- إن العلاقات الرياضية التي تم استنتاجها صالحة لخط ضخ من خزان أرضي إلى خزان عالي، وتحتاج للمعايرة والدراسة على خطوط الضخ البترية وتحديد أماكن التطعيم المناسبة.

7- المراجع

1. BOULOS, P. F; KARNEY, B. W; WOOD, D. J; LINGIREDDY, S. 2005. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. Journal-American Water Works Association, 97(5), 111-124.
2. FRIEDMAN, M; RADDER, L; GULLICK, R; WOOD, D. 2003. Verification and control of low pressure transients in distribution systems. In 2003 Water Quality Technology Conference: Stewardship of Drinking Water Quality (p. 2003).
3. JONES, G. M; SANKS, R. L; BOSSERMAN, B. E; TCHOBANOGLIOUS, G. 2006. Pumping station design. Gulf Professional Publishing.
4. MASSOUH, F 2009. Means of protection against water hammer in hydraulic networks. Faculty of Civil Engineering- Tishreen University.
5. MASSOUH, F; COMOLET, R 1984. Étude d'un système anti-bélier en ligne-study of a water-hammer protection system in line. La Houille Blanche 5, 355-362.
6. Pezzinga, G. 2002. Unsteady flow in hydraulic networks with polymeric additional pipe. Journal of Hydraulic Engineering, 128(2), 238-244.
7. POTHOF, I; KARNEY, B. 2012. Guidelines for transient analysis in water transmission and distribution systems. In Water Supply System Analysis-Selected Topics. IntechOpen.
8. RAMOS, H; COVAS, D; BORGA, A; LOUREIRO, D. 2004. Surge damping analysis in pipe systems: modelling and experiments. Journal of Hydraulic Research, 42(4), 413-425. Hydraul. Res. 42, 413-425.
9. STEVANOVIC, V. D. 2009. Dynamic loads by various water hammer phenomena. Structural Integrity and Life-Integritet I Vek Konstrukcija, 9(1), 51-56.
10. TRIKI, A. 2016. Water-hammer control in pressurized-pipe flow using

- an in-line polymeric short-section. Acta Mechanica, 227(3), 777-793.
11. TRIKI, A. 2017. Water-hammer control in pressurized-pipe flow using a branched polymeric penstock. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 8(4), 04017024.
12. عبد الجليل، إبراهيم؛ شاکر، أمجد 2015. دراسة موقع الصمامات ونوعها المؤثرة في قيم الضغط الناتج عن الصدمة المائية. رسالة ماجستير في قسم هندسة وإدارة الموارد المائية، جامعة البعث، سوريا.
13. قدسية، سامي؛ الغداء، علا محمد 2016. تحليل ونمذجة العوامل المؤثرة على حدوث الصدمة المائية في محطات ضخ مياه الري التابعة لمشروع ري هضبة عين البيضاء. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية. سلسلة العلوم الهندسية، المجلد (38)، العدد (6).
14. معلا، معلا 2014. العلاقة بين فعالية وسائل الحماية من الصدمة المائية والمسار الطولي للأنبوب. مجلة جامعة البعث، المجلد (37)، العدد (13).
15. نخلة، وسام؛ سابا، جهاد 2016. الصدمة المائية والفعل المتبادل بين الماء وجدار الأنبوب والترية. مجلة جامعة دمشق، سوريا، المجلد (32)، العدد (1).
16. جرجي، عادل 2011. دراسة تأثير درجة حرارة الماء على سرعة انتشار موجة الصدمة الهيدروليكية في أنابيب البولي إيثيلين. مجلة جامعة البعث، المجلد (33)، العدد (6).